

土坯围护墙-木结构民居抗震加固振动台试验研究

周铁钢¹, 朱瑞召¹, 朱立新², 于 文², 左德亮¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要: 土坯围护墙-木结构传统民居在我国分布量大面广, 实际震害表明该类型民居除木结构节点容易发生破坏外, 围护墙体经常出现开裂、外闪, 甚至倒塌现象。对此提出的加固措施包括: 对木结构榫卯节点采用扁铁、薄钢片和角钢进行加固; 在土坯墙体内外水平刻槽并设置配筋砂浆带, 以增强土坯墙体水平抗剪能力, 及与木结构之间可靠拉接。为验证以上措施的有效性, 制作了单层两开间、1/2 缩尺房屋加固模型, 并进行了模拟地震振动台试验。试验结果表明: 7 度设防地震作用时墙体未见破坏, 8 度设防地震作用时墙体有轻微裂缝, 8 度罕遇地震作用时模型最大位移角达到 1/61, 墙体开裂较多, 但由于约束较好, 未有土坯剥落现象, 并可以继续承载。试验过程中, 加固后的木结构自始至终没有发生破坏, 且与土坯围护墙体协同工作良好, 总体上实现了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标。

关键词: 传统民居; 土坯围护墙; 木结构; 抗震加固; 振动台试验

中图分类号: TU366.2; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0346-05

Shaking table test study on a seismic strengthening adobe-wall-shielding and timber-structure-bearing dwelling

ZHOU Tiegang¹, ZHU Ruizhao¹, ZHU Lixin², YU Wen², ZUO Deliang¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The traditional dwelling of timber-structure-bearing and adobe-wall-shielding is widely distributed in our country. The practical earthquake damage shows that timber structure nodes are prone to damage and adobe wall to crack. Outside the wall, there are even collapse phenomenon. This paper puts forward the following reinforcement measures: reinforce the joints by using flat iron, thin plate and angle steel; notch horizontal groove both inside and outside the adobe wall and set the reinforced mortar in the groove to strengthen the adobe wall horizontal shear capacity and the wall is tied with the timber structure in a reliable way. In order to verify the effectiveness of the above measures, building reinforcement model of single-storey, two bays and 1/2 scale were made and a shaking table seismic simulated test was carried out. Shaking table test results show that: the walls are not damaged under the 7-intensity fortification earthquakes. Crack is slight under the Magnitude 8 fortification earthquake. The maximum displacement angle of the model is 1/61 and the wall cracks are more under the Magnitude 8 seldom occurred earthquake, but adobe don't appear peeling phenomenon and the wall can continue to load due to the constraint is better. During the test, the reinforced timber structure help didn't damage and worked well together with the wall. The reinforcement model can achieve the design objective of operational under small earthquakes, repairable damage under medium earthquakes, and collapse prevention under large earthquakes.

Key words: traditional dwelling; shielding adobe wall; timber structure; seismic reinforcement; shaking table test

以榫卯节点为特征的传统木结构是我国传统民居中分布最广泛、既存数量最多的民居结构形式, 并且在建筑形式上灵活多样, 种类繁多。作为民间建筑, 传统木结构民居在材料选择、营建工艺、使用维护等方面不同于我国古代官式建筑, 加之大部分年久失修, 承重木构件腐朽、虫蛀严重, 总体安全性能不容乐观。近年来, 国内外关于木结构抗震加固陆续开展研究, 但研究主要集中在古建筑木结构的节点、构件或单纯木构架研究, 对于传统民居尤其是木构架围护墙体整体抗震加固研究较少。2008 年汶川地震以来的历次震害资料表明, 有相当部分木结构民居在 8 度以上烈度区产生严重破坏, 如出现节点脱榫、滑落, 杆件断裂, 甚至整体

散架现象。另外, 国内传统木结构民居一般采用生土墙或砖墙围护, 由于这些围护墙与木结构之间缺乏可靠连接, 地震时相互之间不能协同工作, 且自身稳定性较差, 大震时非常容易倒塌。本文根据以上情况及实地调查, 制作了一个典型的土坯围护墙-木结构传统民居房屋模型, 通过抗震加固与模拟地震振动台试验, 以探讨所采取的加固方法及措施的可行性, 希望对当前传统民居的安全性改造提供一些技术参考。

1 模型的设计与加固

1.1 模型设计

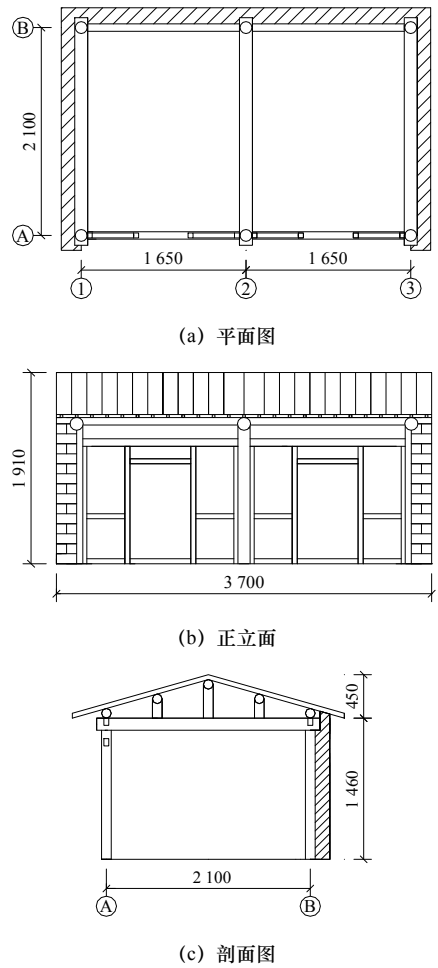
试验原型房屋位于北京顺义, 单层 5 开间, 承

重结构为我国北方典型的传统抬梁式木结构, 围护墙体为土坯墙. 根据西安建筑科技大学振动台台面尺寸及承载能力, 试验采用 2 开间、1/2 缩尺模型, 模型各参数相似比例关系^[1-2]见表 1.

表1 模型相似比
Tab.1 Similitude ratios of model

物理量	相似关系	相似比	物理量	相似关系	相似比
质量	S_m	0.144	周期	$S_T=(S_m/S_K)^{0.5}$	0.537
长度	S_L	0.5	竖向压应力	$S_\sigma=S_m/S_L^2$	0.576
弹性模量	S_E	1	输入加速度	$S_a=S_E/S_\sigma$	1.736
刚度	$S_K=S_E S_L$	0.5	线位移	$S_x=S_L$	0.5

模型如图 1 所示, 长 3.70 m, 宽 2.85 m, 檐高 1.46 m, 脊高 1.91 m. 抬梁式木结构由木柱 (直径 110 mm)、托梁 (直径 120 mm)、瓜柱 (直径 100 mm)、檩条 (直径 100 mm)、檐枋 (75×50 mm) 和木椽 (直径 30 mm, 实际采用 20×30 mm 的小方木代替) 组成, 构件所用木材是与原型相同 (东北落叶松). 围护墙厚 200 mm, 土坯制作及砌筑工艺与原型基本相同, 屋面椽子上铺设薄木板和草泥保温层. 上述木构件及土坯墙均按比例缩尺, 土坯的立压强度为 1.30 MPa, 卧压强度为 1.03 MPa.



(d) 加固前模型照片



(e) 模型加固后的立面照片

图1 模型设计
Fig.1 Design of model

1.2 模型加固方法与措施

历次震害^[3-5]表明木结构可能发生脱榫和折榫破坏, 或节点转动较大时形成铰接, 整个结构转为几何可变体系, 当地震作用较大时就会发生倾斜或倒塌. 因此对木结构自身的加固主要是增强节点的承载能力, 适度提高节点的转动刚度与木结构的整体刚度, 同时不过多减小木结构的耗能减震特性. 对于木结构中的围护墙体, 在地震中的破坏主要表现为局部开裂、外闪, 严重时倒塌. 出现这种状况的主要原因是墙体自身强度、稳定性与变形能力较差, 同时由于墙体与木结构主体之间没有连接, 大震时木结构侧移变形较大, 对墙体产生外推所致. 因此对于围护墙体的加固应该是一方面提高墙体自身强度、整体性和变形能力, 一方面加强围护墙体与主体木结构之间的连接, 这样两者可以捆绑在一起协同工作, 围护墙体主要承担水平地震作用, 并增加了房屋刚度, 使得房屋整体侧移大大较小, 同时木结构对围护墙体产生一定的拉接、支撑及约束作用, 进而提高围护墙体的稳定性与抗倒塌性能.

根据上面思路, 并参考已有加固方法^[6-9], 及经济性考虑, 采取的具体加固措施如下.

(1) 对木构件节点的加固 (图 2 所示): 木柱与托梁连接处采用 L 50×50×3 等边角钢加固, 角钢与木柱和托梁分别用 8 颗自攻螺丝 (以下所用自攻螺丝均为此规格, 直径 6 mm, 长 40 mm) 固定; 木柱与檩条和檐枋用 2 mm 厚的薄钢片 (如图 3 所示) 连接, 薄钢片与木柱、檩条和檐枋分别采用 6

颗、8颗和8颗自攻螺丝固定;瓜柱与托梁和檩条连接处用 $30\times 3\text{ mm}$ 扁铁加固,扁铁两端头与瓜柱分别用2颗自攻螺丝固定.以上铁件所用钢材均为Q235钢,事先钻孔,孔的位置按照规范设计,满足边、端距和间距要求.

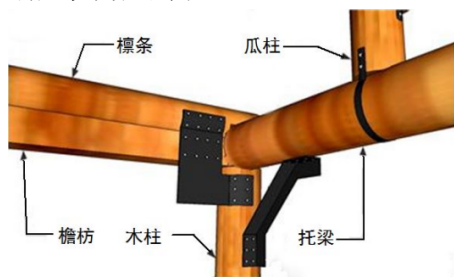


图2 木结构节点加固

Fig.2 Reinforcement of timber structure node

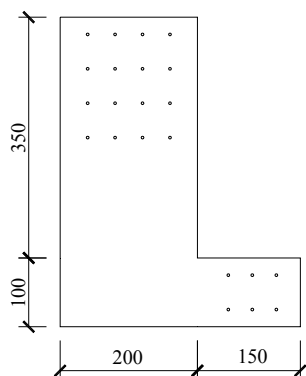


图3 钢片示意图

Fig.3 Drawing of sheet-steel

(2) 土坯围护墙加固(图4所示):使用手提切割机在墙体两侧刻槽,槽内设置砂浆配筋带对墙体进行加固.刻槽高度100 mm,深25 mm.刻槽位置:檐口以下共设三道水平槽;山墙瓜柱部位设置三道竖向槽.槽内钢筋:纵向配 $2\Phi 4$ 钢筋,每隔200 mm设 $2\Phi 4$ 穿墙钢筋,将两侧槽内纵向钢筋拉接.钢筋连接完成后,对槽内浮土进行清除,适当喷水后在槽内分两次抹上水泥砂浆,砂浆标号M15.

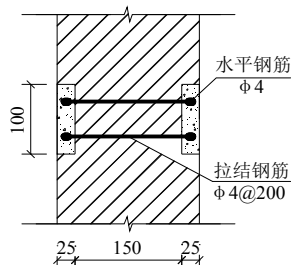


图4 嵌槽砂浆配筋带示意

Fig.4 Drawing of reinforced mortar in the groove

(3) 土坯围护墙与木结构的连接(图5所示):在木柱与土坯墙水平砂浆配筋带结合处,设置 Ω 型 $\Phi 6$ 钢筋2道,将木柱箍牢,钢筋两端深入水平槽

内,并与槽内钢筋焊接;木柱两侧与墙体的凹缝处,用水泥砂浆塞填并形成竖向壁柱,以保护 Ω 型钢筋,并夹紧木柱,使得木柱与墙体可靠连接.山墙瓜柱部位设置的三道竖向槽内,同样设置 Ω 型钢筋将山墙顶部与瓜柱拉接.

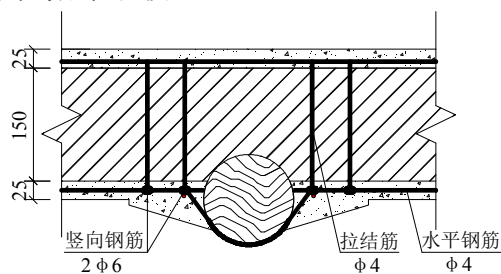


图5 木柱与墙体拉接示意

Fig.5 Drawing of the timber column tied with the wall

2 试验工况及测试

试验在西安建筑科技大学教育部结构与抗震重点实验室进行.规定模型纵向为 Y 向,横向为 X 向.为测得振动台台面、基座、半墙高、檐口、山墙尖和屋脊处加速度,在相应位置处布置了18个加速度计;为测得振动台台面、基座、檐口和屋脊处位移,在相应位置处布置了10个位移计.

为了验证加固措施的一般性,兼顾中西部地区土坯墙围护-传统木结构民居当前的加固改造需求,试验选用两条II~IV类场地天然波(EL Centro波和江油波)和一条II类场地人工波.

为得到原型房屋在0.1 g(7度设防)、0.2 g(8度设防)、0.3 g(8.5度设防)、0.4 g(8度罕遇)四个加速度输入下的地震反应,加载前按照相似关系对地震波加速度峰值、持续时间、时间间隔加以调整.实际操作时,对模型房屋的台面输入依次为:173 gal(7度设防)、347 gal(8度设防)、520 gal(8.5度设防)、691 gal(8度罕遇),且每个加速度峰值下,依次单向输入 X 和 Y 向上述三种波.上述工况完成后,鉴于模型房屋尚有承载能力,最后一个工况采用EL Centro波一次加载至810 gal(介于8度罕遇与8.5度罕遇地震之间).试验过程中,在每个加载级别前后都进行了一次白噪声扫频,以考察模型房屋的自振频率变化情况.

3 试验现象

在整个试验过程中,主体木结构没有发生破坏且能保持整体稳定.8度罕遇地震作用时,节点加固的薄钢片仅轻微变形,墙体和木结构出现轻微脱

离, 两者能够始终协同工作. 墙体损坏如图 6 所示.

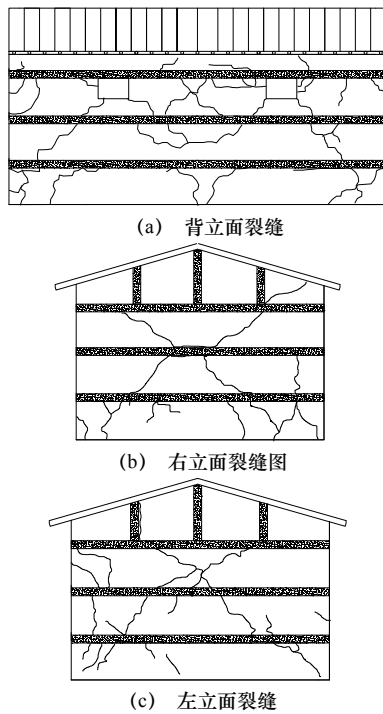


图6 模型裂缝图
Fig.6 Photographs of model cracks

(1) 173 gal (7 度设防) 地震作用下, 墙体未发现可见裂缝, 结构基本处于弹性阶段.

(2) 347 gal (8 度设防) 地震作用下, 后墙两高窗下角都出现了斜裂缝, 并延伸到加固带边缘, 裂缝宽度较小 (约 0.1 mm), 长度约 160 mm; 山墙前下角与基座接触处均出现松动; 加载过程中, 随着房屋水平晃动, 木结构发出“吱吱”声响; 屋盖和墙体发生轻微滑移.

(3) 520 gal (8.5 度设防) 地震作用下, 后墙高窗上下角出现斜裂缝, 并在加固带边缘发展为水平裂缝, 裂缝宽约 0.3 mm; 后墙在与中间木柱对应处出现竖向裂缝, 宽度 0.2 mm; 后墙、山墙底部与基座出现水平滑移; 后墙上部两条加固带和墙体在接触面处发生轻微错动; 部分木柱根部砂浆有脱落现象.

(4) 691 gal (8 度罕遇) 地震作用下, 墙面原有裂缝持续发展, 最大宽度约 2 mm, 但均在水平配筋带处截止; 在后墙的四角和中上部出现新斜裂缝, 和原来裂缝形成“X”形、八字形, 分布于水平配筋带间; 木柱周边砂浆脱落明显; 土坯墙与水平配筋带间滑移错动明显; 木结构变形声响较大.

(5) 810 gal 地震作用下, 围护墙体与木结构间有明显错动倾覆现象, 但由于水平配筋带的有力约束, 墙体与木结构之间尚未严重脱离; 除了在后墙中柱处出现两条裂缝外, 其余部分均未出现新裂缝; 虽然晃动剧烈, 但整体上还没有倒塌迹象.

4 试验结果分析

4.1 模型动力特性

通过用白噪声对模型进行扫频, 得到模型在不同级别加载前后的自振频率, 见表 2. 模型初始一阶频率为 8.52 Hz (Y 向平动), 二阶频率为 8.67 Hz (X 向平动). 随着台面输入增大, 墙体裂缝逐渐增多、延伸, 模型房屋频率呈减小趋势, 但减小幅度逐渐降低. X 和 Y 向自振频率自始至终都比较接近, X 向降幅略比 Y 向小.

表2 模型的自振频率 Tab.2 Natural frequencies of model				
试验 工况	Y 向		X 向	
	频率/Hz	降幅/%	频率/Hz	降幅/%
试验前	8.52	—	8.67	—
173 gal	7.97	6.46	8.28	4.50
347 gal	6.56	23.00	6.54	24.34
520 gal	5.1	40.14	5.45	37.14
691 gal	4.15	51.29	5.1	41.18
810 gal	3.9	54.23	4.35	49.83

4.2 模型加速度反应

通过对试验数据的分析, 模型檐口和屋脊处加速度相对基座的放大系数如图 7 所示.

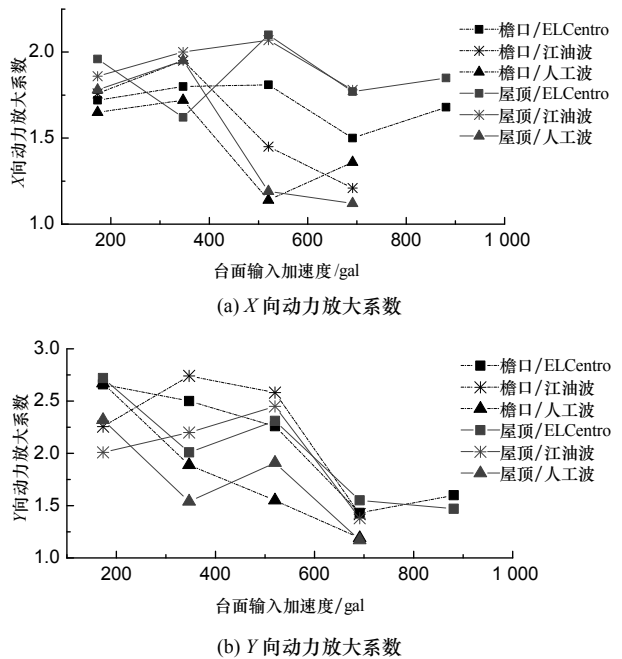


图7 动力放大系数
Fig.7 Dynamic magnification factors

在粘滞阻尼体系中, 动力放大系数主要和模型的阻尼比 (成反比) 与频率比 (模型频率和振动频率比越接近 1, 动力反应越大, 共振现象) 有关. 由图可以看出, 随着台面输入增加, 模型裂缝逐渐开展损伤增大, 结构的阻尼与耗能性能逐渐增强, 动力放大系数逐渐减小. 但 X 向动力放大系数大部分

位于 1.5~2 之间,与后墙裂缝开展情况一致,即裂缝没有突然地大量出现。其次,相同台面输入下,不同地震波的动力放大系数有所不同,这可能与地震波的频谱特性有关。总体来说 X 向加载时,模型对 EL Centro 波最敏感对人工波反应最弱; Y 向加载时,模型对江油波最敏感对人工波反应最弱。另外,实测动力放大系数均大于 1,表明相对于传统纯木结构房屋^[10],模型房屋的抗侧刚度明显增强。

4.3 模型位移反应

表3为模型房屋各处的位移反应与墙体位移角。

表3 位移反应最大值

Tab.3 Peak values of displacements

地震波	台面 加速度/gal	基座 位移/mm	檐口 位移/mm	屋脊 位移/mm	墙体 位移角
ELCentro 波 X 向	173	16.32	18.04	17.76	1/849
	347	28.63	33.72	32.09	1/287
	520	43.12	54.58	50.22	1/168
	691	62.81	82.61	74.81	1/73
	810	73.07	98.88	90	1/57
ELCentro 波 Y 向	173	9.82	10.74	10.04	1/1 780
	347	18.79	21.28	21.99	1/457
	520	27.79	35.85	33.02	1/181
	691	36.11	46.73	45.93	1/137
	810	42.98	56.81	58.51	1/94
江油波 X 向	173	9.63	10.93	10.63	1/1 123
	347	17.23	23.56	21.46	1/231
	520	27.29	49.01	44.09	1/121
江油波 Y 向	691	32.5	65.22	56.7	1/61
	173	6.97	7.6	6.79	1/2 317
	347	12.31	14.19	13.78	1/777
	520	17.52	22.14	23.24	1/255
人工波 X 向	691	23.82	31.2	28.44	1/198
	173	9.38	11.36	11.1	1/737
	347	17.25	23.29	21.95	1/242
人工波 Y 向	520	26.75	37.4	32.68	1/87
	691	32.46	50.28	46.56	1/82
	173	8.44	9.5	8.94	1/1 377
	347	16.34	19.4	19.31	1/477
人工波 Y 向	520	21.86	26.27	27.12	1/268
	691	30.23	37.66	34.24	1/191

由表中数值可以看出,模型 X 向位移大于 Y 向;随台面输入逐渐增大,各点位移增加,但基本上屋脊处位移略小于檐口处位移(个别例外),这可能与屋脊位移计设置在草泥屋面上有关(草泥有干缩裂缝,屋面刚度较小)。墙体位移角用同一时刻檐口和基座处位移差除以墙高得到,墙体最大位移角随台面输入逐渐增大。810 gal 地震作用下位移角最

大达到 1/57,此时,墙体上的裂缝已基本稳定,但裂缝的宽度较大,墙体有明显的倾覆现象并伴随有局部振动。位移角达到 1/57,但墙体并未,主要可能由于墙体裂缝不断开展,导致其刚度不断下降,砂浆配筋带对墙体的约束减弱,墙体在随结构整体振动的同时伴随着局部振动而造成墙顶处位移反应的急剧增大,而造成位移失真。但也能说明通过加固,模型房屋具有较好的变形能力。

5 结论

(1) 从模型制作过程来看,此加固方法简单易行,且所用材料均为常用材料,加固费用较少。

(2) 模型在地震作用下,山墙出现“X”形裂缝,后墙在窗洞角部出现典型的剪切斜裂缝,上述裂缝在发展时受到了砂浆带约束。

(3) 试验过程中,木结构节点没有发生折榫和脱榫破坏,表明节点承载能力和刚度有明显提高。

(4) 大震时由于设置的嵌槽配筋砂浆带对土坯墙体产生良好约束,虽然房屋水平位移角达到 1/61,但墙体裂缝发展受到很大限制,未出现土坯剥落现象。说明木结构与围护墙体协同工作良好,房屋整体性与变形能力显著增强。

(5) 加固后模型结构总体上可以实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标。

参考文献 References

- [1] 熊仲明,王社良. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
XIONG Zhongming, WANG Sheliang. Civil engineering structural experiment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [2] 郑山锁. 动力试验模型在任意配重条件下与原型结构相似关系[J]. 工业建筑, 2000, 30(3): 35-39.
ZHENG Shansuo. Analogical ratio between scale models with less ballast and their prototypes under shaking table test[J]. Industrial Construction, 2000, 30(3): 35-39.
- [3] 赵书锋,马志刚. 云南彝良地震村镇房屋震害启示及减灾对策[J]. 世界地震工程, 2013, 29(1): 152-159.
ZHAO Shufeng, MA Zhigang. Seismic damage investigation and analysis on rural buildings in Wenchuan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(1): 152-159.
- [4] 谢启芳,赵鸿铁,薛建阳,等. 汶川地震中木结构建筑震害分析与思考[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, 40(5): 658-661.
XIE Qifang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Analysis and investigation on the seismic damage of timber buildings in Wenchuan earthquake[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition), 2008, 40(5): 658-661.

(下转第 370 页)

状态下, Q460D钢呈现出类似于解理似的层状平滑断裂机制; 在拉剪复合应力状态下, Q460D钢呈现出“复合微孔型”断裂机制。

参考文献 References

- [1] 周晖, 王元清, 石永久, 等. 基于微观机理的梁柱节点焊接细节断裂分析[J]. 工程力学, 2015(5): 37-50.
ZHOU Hui, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, et al. Fracture analyses of welded details in beam-to-column connections using micromechanics-based models[J]. Engineering Mechanics, 2015(5): 37-50.
- [2] 李国强, 王彦博, 陈素文, 等. 高强度结构钢研究现状及其在抗震设防区应用问题[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 1-13.
LI Guoqiang, WANG Yanbo, CHEN Suwen, et al. State-of-the-art on research of high strength structural steels and key issues of using high strength steels in seismic structures[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 1-13.
- [3] BRIDGMAN P W. Studies in large plastic flow and fracture[M]. New York: McGraw-Hill, 1952.
- [4] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(3): 201-217.
- [5] HANCOCK J W, MACKENZIE A C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1976, 24(2/3): 147-160.
- [6] GURSON A L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 1977, 99(1): 2-15.
- [7] NEEDLEMAN A, TVERGAARD V. An analysis of ductile rupture in notched bars[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1984, 32(6): 461-490.
- [8] BAI Y, WIERZBICKI T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and lode dependence[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(6): 1071-1096.
- [9] BAI Y, WIERZBICKI T. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture[J]. International Journal of Fracture, 2010, 161(1): 1-20.
- [10] CAO T S, GAILLAC A, MONTMITONNET P, et al. Identification methodology and comparison of phenomenological ductile damage models via hybrid numerical-experimental analysis of fracture experiments conducted on a zirconium alloy[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(24): 3984-3999.
- [11] BAI Y, WIERZBICKI T. A comparative study of three groups of ductile fracture loci in the 3D space[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 135: 147-167.
- [12] 全国钢标准化技术委员会. GB/T 1591-2008. 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
The Technical Committee on Steel of Standardization Committee of China. GB/T 1591-2008. High strength low alloy structural steels[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [13] ASTM International. ASTM International. Standard test methods for tension testing of metallic materials: ASTM E8/E8M-11[S]. West Conshohocken PA: ASTM International, 2011.
- [14] BAO Y, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(1): 81-98.

(编辑 桂智刚)

(上接第350页)

- [5] 周铁钢, 钱相博, 张冰冰. 芦山地震农村房屋震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 3(33): 53-58.
ZHOU Tiegang, QIAN Xiangbo, ZHANG Bingbing. Investigation and analysis of damage to rural houses in Lushan earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 3(33): 53-58.
- [6] 杨威, 王满生, 纪晓东, 等. 北京地区砖木结构抗震加固动力特性分析[J]. 土木工程学报, 2014, 3(47): 26-32.
YANG Wei, WANG Mansheng, JI Xiaodong, et al. Dynamic characteristic analysis on seismic strengthening of existing rural masonry-timber buildings in Beijing[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 3(47): 26-32.
- [7] 葛学礼, 朱立新, 黄世敏. 镇(乡)村建筑抗震技术规程实施指南[M]. 中国建筑工业出版社, 2010.
GE Xueli, ZHU Lixin, HUANG Shimin. Guidelines for the implementation of the technical code for seismic resistance of buildings in the town(township)village[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [8] 于文. 新疆喀什土房屋模型振动台试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2007.
YU Wen. Experimental study on shaking table test of a raw-soil building model in Kashi, Xinjiang[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2007.
- [9] 姚侃, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木结构榫卯连接的扁钢加固试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 10(41): 220-224.
YAO Kan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental studies on seismic characteristic of strengthened mortise-tenon joint in historical timber buildings[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 10(41): 220-224.
- [10] 薛建阳, 张凤亮, 赵鸿铁, 等. 碳纤维布加固古建筑木结构模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 11(45): 95-104.
XUE Jianyang, ZHANG Fengliang, ZHAO Hongtie, et al. Shaking table test of an ancient timber structure strengthened with CFRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 11(45): 95-104.

(编辑 桂智刚)